基于多对一 Gale-Shapley 算法的 D2D 通信资源分配 *

李中捷，谢东朋†

(中南民族大学 智能无线通信湖北省重点实验室，武汉 430074)

摘 要：针对 D2D 通信复用异构蜂窝网络上行信道产生的干扰问题和频谱资源优化问题进行研究，提出一种基于多对一 Gale-Shapley 算法的 D2D 通信资源分配方案。本方案允许多个 D2D 用户共享一个蜂窝用户信道资源，通过设置信干噪比（SINR）门限保证用户的通信服务质量（QOS）。根据信道分配情况，构建 D2D 用户和信道的偏好列表，最大化系统总容量。仿真结果表明，该方案收敛较快、复杂度较低，能够有效保证用户的通信服务质量，系统总容量接近最优解。本研究为实现 D2D 用户和蜂窝用户的频谱资源共享，提高频谱利用率提供了一种有效方案。

关键词：D2D 通信；Gale-Shapley 算法；异构蜂窝网络；资源分配；系统容量

中图分类号：TN929.53　　doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2018.02.0050

Resource allocation for D2D communication based on many-to-one Gale-Shapley algorithm

Li Zhongjie, Xie Dongpeng†

(*Hubei Key Laboratory of Intelligent Wireless Communication*, *South-Central University for Nationalities*, *Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of interference and spectrum optimization caused by D2D (device-to-device) communication multiplexing uplink channel of heterogeneous cellular networks, this paper proposed a resource allocation scheme based on many to one Gale-Shapley algorithm. It allowed multiple D2D users to share a cellular user channel resource and guaranteed the communication quality of service (QOS) of users by setting the threshold of signal to interference and noise ratio (SINR) . The scheme constructed a preference list for D2D users and channels and maximized system total capacity based on channel allocation. Simulation results show that the scheme converges fast and has low complexity. The system total capacity is close to the optimal solution while guarantees the quality of service of users effectively. The research provides an effective scheme to realize the spectrum sharing between D2D users and cellular users and improve spectrum utilization.

Key words: D2D communication; Gale-Shapley algorithm; heterogeneous cellular network; resource allocation; system capacity

0 引言

为了提高无线频谱利用率，D2D 通信作为很有前景的技术成为近些年的研究热点[1~3]。传统蜂窝网络用户之间需要经过基站转发数据来进行通信，而 D2D 用户可以进行近距离的直接通信。因此，与蜂窝通信相比，D2D 通信有更小的通信延迟，能够通过复用蜂窝用户的频谱资源来提高频谱效率，获得更高的吞吐率和能量效率[4]。由于复用蜂窝频谱资源会在蜂窝通信和 D2D 通信之间产生严重的干扰[5]，大量研究工作采用资源分配减轻干扰[6~10]。文献[6]提出了一种基于局部搜索的资源分配算法，该算法只能获得局部最优解。文献[7]提出了一种分布式资源分配算法，然而并没有明确给出相比其他算法所获得的性能增益。文献[8]提出了一种基于背包理论的干扰感知资源分配算法，但在很多情况下，该算法并不能得到一个可行的分配结果。文献[9]中首先给 D2D 用户分配资源，然后根据 D2D 用户在每个资源块上的分配情况为蜂窝用户分配资源，但是在实际中一般要先保证蜂窝用户的通信，所以蜂窝用户在进行比例公平调度时改变了权值，降低了公平性。由 Gale 和 Shapley 两人提出的一对一 Gale-Shapley 算法（延迟接受算法）最初应用是为了合理的解决男女婚姻匹配问题，使男女之间达到一个合理的匹配[10]。文献[11]提出了一种基于延迟接受算法的稳定匹配方案为 D2D 用户分配资源，但该方案有以下几点不足：a）以距离为准则建立用户的偏好列表并不是最好的选择；b）当一次性为蜂窝用户分配好资源时并没有考虑到蜂窝用户服务质量的限制；c）只允许一个 D2D 对共享一个蜂窝用户的频谱资源，因此随着 D2D 用户的增多，不能更好地提高频谱利用率；d）仿真环

收稿日期：2018-02-03；修回日期：2018-03-16　　基金项目：国家自然科学基金资助项目（61379028，61671483）；湖北省自然科学基金重点资助项目（2016CFA089）

作者简介：李中捷（1974-），男，湖北武人，副教授，博士，主要研究方向为异构蜂窝网络、毫米波通信网络；谢东朋（1991-），男（通信作者），硕士研究生，主要研究方向为 D2D 通信（18064095402@163.com）.

境只是考虑单小区的蜂窝网络，并没有考虑异构蜂窝网络的情况。本文针对这四点不足对文献[11]中的算法进行改进，提出一种在异构蜂窝网络环境下基于多对一 Gale-Shapley 算法的资源分配方案。仿真结果显示，本方案在保证蜂窝用户的通信服务质量的前提下，能够增加 D2D 用户的连接数，提高系统总容量。

1　系统模型和问题规划

1.1　系统模型

本文研究 D2D 用户复用异构蜂窝网络上行信道的资源分配问题，假设信道总数为 N，宏蜂窝用户信道只能被一个微蜂窝用户复用，但能被多个 D2D 用户复用，同时假设一个微蜂窝用户或 D2D 用户只能复用一个信道资源。如图 1 所示的异构蜂窝网络中有三种通信模式的用户和两种基站，宏基站位于小区中心，微蜂窝基站以密度为 λ_s 的泊松点过程在小区中随机分布，蜂窝用户和 D2D 用户分别以密度为 λ_c 和 λ_d 的泊松点过程在小区中随机分布。各基站可以获取各个通信链路的信道状态信息。集合 $M=\{1,2,\cdots,C\}$，$W=\{1,2,\cdots,J\}$，$H=\{1,2,\cdots,D\}$ 分别代表宏蜂窝用户集合，微蜂窝用户集合和 D2D 用户集合。

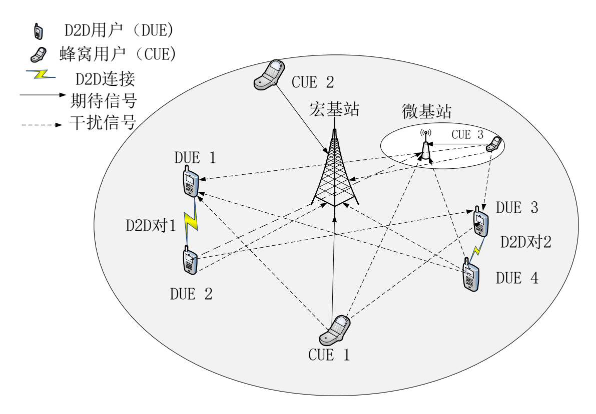


图 1　异构蜂窝网络通信系统

根据文献[12]，路径损耗模型如式(1)所示。其中：d 代表发射机与接收机之间的距离（单位为 m）； f_c 为载频。

$$PL=36.7\lg(d)+22.7+26\lg(f_c) \tag{1}$$

信道增益由路径损耗和小尺度衰落构成，所以信道增益可以表示为式(2)。其中：$PL^{a,b}$ 和 $h^{a,b}$ 分别代表 a 和 b 之间的路径损耗和小尺度衰落系数。

$$G^{a,b}=PL^{a,b}h^{a,b} \tag{2}$$

为了研究干扰最严重的情况，假设 N 个信道资源全部被 C 个宏蜂窝用户占用，如果一个宏蜂窝用户只能占用一个信道，则 $N=C$。J 个微蜂窝用户和 D 个 D2D 用户分别复用这 N 个信道资源。二进制变量 X_c^n、X_j^n 和 X_d^n 为 1 时表示宏蜂窝用户 c、微蜂窝用户 j 和 D2D 用户 d 使用信道 n，否则为 0。

宏蜂窝用户 c 在信道 n 上的信干噪比为

$$SINR_c^n=\frac{P^cG^{c,B}}{\sum_{j\in W}X_j^nP^jG^{j,B}+\sum_{d\in H}X_d^nP^dG^{d,B}+N_0} \tag{3}$$

其中：P^c 为宏蜂窝用户 c 的发射功率；P^d 和 P^j 是 D2D 用户 d 和微蜂窝用户 j 的发射功率；$G^{c,B}$ 是宏蜂窝用户 c 到宏基站 B 的信道增益；$G^{j,B}$ 是微蜂窝用户 j 到宏基站 B 的信道增益；$G^{d,B}$ 是 D2D 用户 d 到宏基站 B 的信道增益；N_0 是噪声功率。

微蜂窝用户 j 在信道 n 上的信干噪比为

$$SINR_j^n=\frac{P^jG^{j,b_j}}{\sum_{c\in M}X_c^nP^cG^{c,b_j}+\sum_{d\in H}X_d^nP^dG^{d,b_j}+N_0} \tag{4}$$

其中：b_j 为微蜂窝用户 j 接入的微蜂窝基站；G^{j,b_j} 是微蜂窝用户 j 到微蜂窝基站 b_j 的信道增益；G^{c,b_j} 是宏蜂窝用户 c 到微蜂窝基站 b_j 的信道增益；G^{d,b_j} 是 D2D 用户 d 到微蜂窝基站 b_j 之间信道增益。

当多个 D2D 用户复用同一个信道资源时，D2D 用户不但要受到宏蜂窝用户和微蜂窝用户的干扰，还要受到在此信道上其他 D2D 用户的干扰，所以 D2D 用户 d 在信道 n 上的信干噪比为

$$SINR_d^n=\frac{P^dG^{d_t,d_r}}{\sum_{c\in M}X_c^nP^cG^{c,d_r}+\sum_{j\in W}X_j^nP^jG^{j,d_r}+\sum_{i\in H,i\neq d}X_i^nP^dG^{i,d_r}+N_0} \tag{5}$$

其中：G^{d_t,d_r} 是 D2D 用户 d 发射方 d_t 与接收方 d_r 之间的信道增益；G^{c,d_r} 是宏蜂窝用户 c 到 D2D 接收方 d_r 的信道增益；G^{j,d_r} 是微蜂窝用户 j 到 D2D 接收方 d_r 的信道增益；G^{i,d_r} 是 D2D 用户 i 到 D2D 接收方 d_r 的信道增益。

1.2　问题规划

本文在宏蜂窝用户和微蜂窝户信道资源分配都已确定，并且保证宏蜂窝用户和微蜂窝用户通信服务质量的前提下，以最大化系统的总容量为目标函数给 D2D 用户分配信道。假设每个信道上可以允许两个 D2D 用户复用，根据香农公式，可以得到优化问题的目标函数及约束条件为式(6)~(11)。

$$\begin{aligned}&\max_{X_c^n,X_j^n,X_d^n,(c\in M,j\in W,d\in H)} T(X_c^n,X_j^n,X_d^n)=\\&\max_{X_c^n,X_j^n,X_d^n,(c\in M,j\in W,d\in H)}\sum_{n=1}^{N}\Big[\sum_{c\in M}X_c^n\log_2(1+SINR_c^n)+\\&\sum_{j\in W}X_j^n\log_2(1+SINR_j^n)+\sum_{d\in H}X_d^n\log_2(1+SINR_d^n)\Big]\end{aligned} \tag{6}$$

$$SINR_c^n\geq SINR_{c,threshold}^n,\forall c\in M \tag{7}$$

$$SINR_j^n\geq SINR_{j,threshold}^n,\forall j\in W \tag{8}$$

$$SINR_d^n\geq SINR_{d,threshold}^n,\forall d\in H \tag{9}$$

$$\sum_{n=1}^{N}X_j^n\leq 1,\sum_{j\in W}X_j^n\leq 1,\forall j\in W \tag{10}$$

$$\sum_{n=1}^{N} X_d^n \le 1, \sum_{d \in H} X_d^n \le 2, \forall d \in H \tag{11}$$

式(7)~(9)保证了宏蜂窝用户，微蜂窝用户和 D2D 用户的信噪比大于门限值。式(10)保证一个微蜂窝用户最多复用一个信道资源，并且一个信道上最多允许一个微蜂窝用户通信。式(11)保证一个 D2D 用户最多复用一个信道资源，并且一个信道资源最多能同时被两个 D2D 用户复用。

2 基于多对一 Gale-Shapley 算法的 D2D 通信资源分配方案

在 1.2 节中，由式(6)~(10)定义的目标函数和约束条件属于混合整数非线性优化问题，最优解需要遍历所有的可能分配，复杂度较高，因此本文研究采用复杂度较低，逼近最优解的次优方案。本方案首先分别建立 D2D 用户和信道的偏好列表。每个 D2D 用户根据在不同信道上的系统容量建立偏好列表 Due_list，偏好列表中每行的第一个值具有最高的偏好值。表 1 展示了三个 D2D 用户的偏好列表。其中，第二个 D2D 用户的偏好列表为 $Due_list(2) = [3,5,2,4,1]$，表示第二个 D2D 用户最想复用的信道资源为 3。按类似方法，每个信道根据让不同的 D2D 用户通信可实现的系统总容量的大小建立信道偏好列表 Channel_list。

表 1 D2D 用户偏好列表

D2D 用户对	偏好级别				
	1	2	3	4	5
1	3	4	5	1	2
2	3	5	2	4	1
3	1	2	3	5	4

本方案还需要定义以下参数：

a)信道与 D2D 用户之间联系的集合 Association，集合 Association(k)表示信道 k 包含已经匹配的 D2D 用户；

b)D 对 D2D 用户最想复用的信道列表 $\Pr e = [\delta_1, \dots, \delta_k, \dots, \delta_D]$，由用户偏好列表可知 δ_k 是 $Due_list(k)$ 列表的第一个元素；

c)定义 Cluster(k)为目前最想复用信道 k 的 D2D 用户对集合，例如 $Cluster(k) = \{1,3,4\}$ 表示当前第 1、3 和 4 个 D2D 用户对最想复用信道 k，即 $\delta(d) = k\left(\forall d \in Cluster(k)\right)$；

d)没有匹配的 D2D 用户对集合表示为 UNMATCH；

e)信道总数 N，迭代次数为 Iteration，最大迭代次数为 MAXGEN。

算法的伪码如算法 1 所示

算法 1 基于多对一 Gale-Shapley 的 D2D 通信资源分配算法

```
1 初始化：设置用户数目，发射功率，路径损耗等系统参数，为宏蜂窝用户和微蜂窝用户分配信道。
2 建立用户偏好列表Due_list,信道偏好列表Channe_list,初始化参数Association，Cluster，UNMATCH。
3 While iteration<MAXGEN do
4     if UNMATCH=Ø
5         for k=1 to N do
6             当前信道 k 上的 D2D 用户对数 S=0
7             If Cluster(k)≠ Ø and S<=2
8                 根据信道 k 的偏好列表 Channel_list（k）从集合 Cluster(k)中找
                  到优先级最高的 D2D 用户 d
9                 if 满足式(7)~(11)约束条件
10                    Association(k)=Association(k) U {d}
11                    UNMATCH=UNMATCH-{d}
12                    S=S+1
13                else
14                    Due_list(d)=Due_list(d)-δd，更新 Pre 和 Cluster(k)
15                end
16                Cluster(k)=Cluster(k)-{d}
17            end
18            for r∈Cluster(k)
19                Due_list(r)=Due_list(r)-δr
20            end
21        end
22        if Due_list(w)=Ø (w∈H)
23            UNMATCH=UNMATCH-{w}
24        end
25    end
26    Iteration= Iteration+1
27 end
```

算法 1 的步骤如下：

a)首先初始化 D2D 用户和信道的偏好列表，集合 Association，未被匹配的 D2D 对集合 UNMATCH，发射功率等参数。

b)第 3~27 行是算法的核心部分，只有达到最大迭代次数，循环才会终止。算法第 7~17 行表示对于每个子信道 k，首先从集合 Cluster(k)中找到一个当前最想复用信道 k 的 D2D 用户对 d，然后检查该用户对是否满足式(7)~(11)的约束条件。如果满足条件，则继续根据信道 k 的偏好列表往 Association(k)中添加 D2D 用户，直到有两个 D2D 对和信道 k 分享资源，否则更新 D2D 用户偏好列表，Cluster(k)和 Pre。

c)算法第 18~20 行表示当信道 k 上已有两个 D2D 对。如果集合 Cluster(k)中还有想复用信道 k 的 D2D 对 r，则信道 k 拒绝分配资源给 D2D 对 r，更新 D2D 对 r 的偏好列表。

d)算法第 22~24 行表示在算法的最后阶段，某些 D2D 用户因为信干噪比门限的限制无法找到合适的信道资源，本文也假设这种用户已找到合适的资源，从集合 UNMATCH 中移除这些 D2D 用户。

3　仿真结果

3.1　仿真环境建立

为了验证所提算法性能，在异构蜂窝网络环境下进行仿真实验。宏蜂窝小区半径设为 1 000 m，蜂窝用户及 D2D 用户在小区中为独立的泊松点过程分布。具体的系统仿真参数设置如表 2 所示。采用蒙特卡洛方法每次随机生成 2 000 个分布场景，最后将本文算法得到的系统性能结果取平均值。假设每个宏蜂窝用户占据单个独立的信道，且每个信道上都有一个微蜂窝用户与宏蜂窝用户复用资源，接入的 D2D 用户需要根据当前的信道状态选择合适的信道进行通信。因为本文假设一个信道资源上最多可以有两对 D2D 用户通信，所以每个信道上接入的 D2D 用户对的数量设置为 2。

表 2　仿真实验中的参数设置

参数名	参数取值
小区半径	1 000 m
D2D 用户能共享的信道数	2
宏蜂窝用户数(信道数目)	10~50
微蜂窝基站密度	$1e^{-5}$ 个/m^2
信道带宽	$1.8e^5$ Hz
D2D 用户发射功率	20 dBm
宏、微蜂窝用户发射功率	20 dBm
高斯白噪声密度	-174 dBm/Hz

3.2　复杂度及性能分析

采用 MATLAB 仿真软件对提出的多对一 Gale-Shapley 算法的 D2D 通信资源分配算法进行仿真，并与基于延迟接受算法（DARA）、随机资源分配算法[13]和最优算法[14]在复杂度及性能上进行了对比。

由于文献[11]中基于延迟接受算法的资源分配方案是在宏蜂窝网络环境下建立的，为了使文献[11]的算法适应宏蜂窝和微蜂窝组成的异构蜂窝网络，本文将匹配的双方改为 D2D 用户和信道。D2D 用户根据在信道上所实现的系统容量建立偏好列表；信道根据让不同 D2D 通信实现的系统总容量的大小建立偏好列表。另外，当信道第一次被分配给 D2D 用户时也需要检查宏蜂窝用户和微蜂窝用户的通信服务质量，这个方案能够使 D2D 用户找到合适的信道，获得 D2D 用户和信道之间的一个稳定匹配，但只允许一个信道最多和一个 D2D 用户分享资源。随机资源分配算法只需满足式(7)~(11)的条件即可获得一种分配方案。

3.2.1 复杂度分析

四种资源分配算法的复杂度分析如下：a）随机资源分配算法复杂度随着蜂窝用户数目的增加线性增长，即为 O（C）（C 为宏蜂窝用户数），算法计算量最低；b）DARA 方案的最坏情况下的复杂度为 $O(C^2)$，平均复杂度为 Clog(C)（C 为宏蜂窝用户数）；c）最优算法是满足约束条件下的穷举搜索算法，需要遍历所有可能的分配方式，计算量最高；d）本文提出方案的复杂度为 $O(N^2)$（N 为信道数量），计算量相比随机分配算法适当增加，但比最优算法计算量显著降低。

3.2.2 性能分析

图 2 的仿真比较了四种资源分配算法的系统总容量。从图中可以看出，系统总容量随着信道数目的增加而变大。当信道数目一定时，本文提出算法的系统总容量优于文献[11]的算法和随机资源分配算法，逼近最优解。因为所提算法允许多个 D2D 用户复用同一个蜂窝用户信道资源，所以获得的系统总容量优于文献[11]中的算法，而随机资源分配算法只是在保证用户通信服务质量的前提下随机进行资源分配，并没有进行系统容量的优化，所以性能最差。

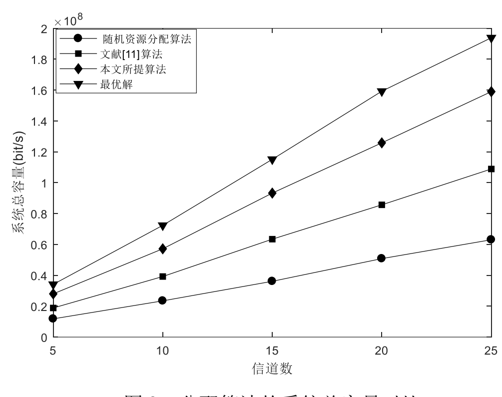


图 2　分配算法的系统总容量对比

图 3 的仿真比较了四种分配算法的最大允许接入 D2D 用户数。从图中可以看出，本文所提算法允许接入的最大 D2D 用户数优于文献[11]的算法和随机分配算法，但达不到理论值。因为本文所提算法能够实现信道和 D2D 用户的一对多匹配，所以能够让更多的 D2D 用户同时进行通信。但是由于 SINR 门限的限制，可允许的连接 D2D 用户数并不能达到理论值。

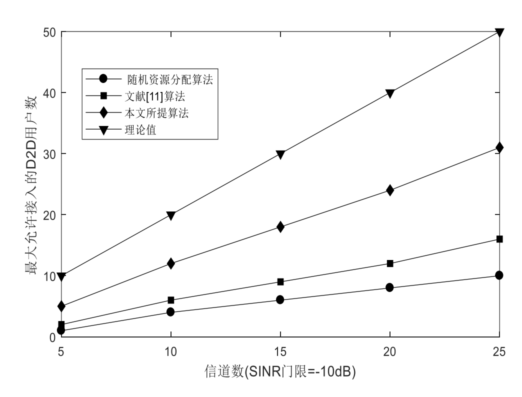


图 3　分配算法的最大允许接入 D2D 用户数对比

图 4 表示 SINR 门限设置为-10 dB 时，蜂窝用户的 SINR 累计分布函数（CDF）。从图中可以看出，宏蜂窝用户和微蜂窝用户的 SINR 均大于指定的门限值。因为 SINR 是保证通信服务质量的重要指标，所以本文所提算法能够保证蜂窝用户通信的服务质量。

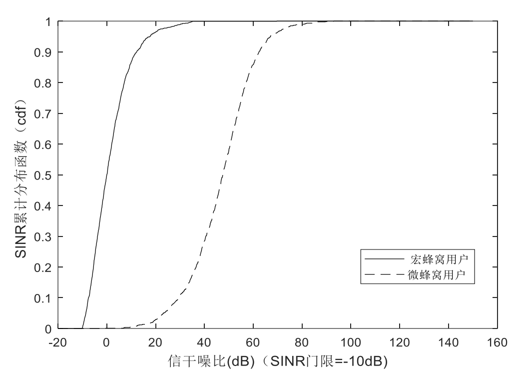


图 4　蜂窝用户的 SINR 累计分布函数

图 5 的仿真结果表明 SINR 门限对系统总容量的影响。从图中可以看出，系统总容量随着 SINR 门限的增加而变小。当 SINR 门限超过 10 dB 时，系统总容量不再变化，达到最小值。这说明为了保证蜂窝用户的通信服务质量，不允许为 D2D 用户分配信道资源进行通信，只有宏蜂窝用户和微蜂窝用户可以进行通信。

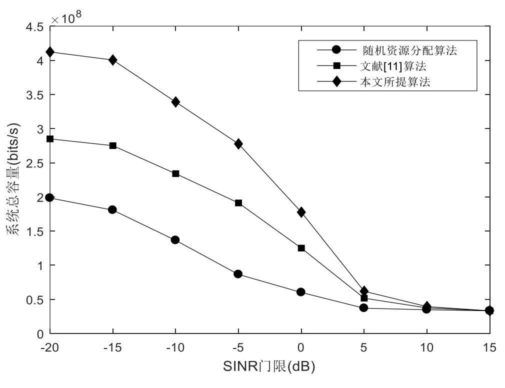


图 5　SINR 门限值对系统总容量的影响

图 6 的仿真结果表明本文所提算法具有较快的收敛性。从图中可以看出，系统总容量随着迭代次数的增加逐步变大，当达到一定迭代次数时，系统总容量趋于稳定，表示已经分配完所有的 D2D 用户。系统中 D2D 用户越多，所需的迭代次数就越多，但总体上算法收敛所需的迭代次数较少，5~8 次即可收敛，计算复杂度较低。

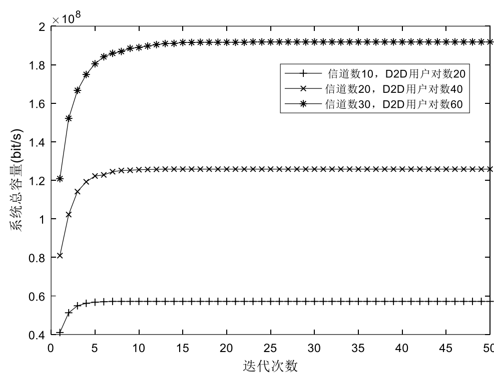


图 6　本文所提算法的收敛性

4　结束语

本文提出的基于多对一 Gale-Shapley 算法的分配算法能够有效地解决异构蜂窝网络环境下 D2D 用户复用蜂窝用户信道的资源分配问题。为了提高无线频谱的利用率，该算法允许多个 D2D 用户共享一个蜂窝用户的信道资源，通过设置 SINR 门限保证蜂窝用户和 D2D 用户的通信服务质量。根据实现的系统容量建立 D2D 用户和信道偏好列表，最大化系统总容量目标函数。通过 MATLAB 仿真对所提出算法、基于延迟接受算法的资源分配算法、随机资源分配算法以及最优的穷举搜索算法的系统总容量和最大允许接入的 D2D 用户数进行了比较和分析，并且分析了所提算法的收敛性和蜂窝用户通信服务质量。仿真结果表明，本文提出的算法收敛速度快、复杂度较低，获得的系统总容量接近最优算法。

参考文献：

[1] Kaufman B, Aazhang B. Cellular networks with an overlaid device to device network [C]// Proc of the 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. 2008: 1537-1541.

[2] Doppler K, Rinne M, Wijting C, *et al.* Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47 (12): 42-49.

[3] Peng Tao, Lu Qianxin, Wang Haiming, *et al.* Interference avoidance mechanisms in the hybrid cellular and device-to-device systems [C]// Proc of the 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2009: 617-621.

[4] Goratti L, Steri G, Gomez K M, *et al.* Connectivity and security in a D2D communication protocol for public safety applications [C]// Proc of the 11th International Symposium on Wireless Communications Systems. 2014: 548-552.

[5] Janis P, Koivunen J, Ribeiro C B, *et al.* Interference-avoiding MIMO schemes for device-to-device radio underlaying cellular networks [C]// Proc of the 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2009: 2385-2389.

[6] Islam M T, Taha A E M, Akl S, *et al.* A local search algorithm for resource allocation for underlaying device-to-device communications [C]// Proc of IEEE Global Communications Conference. 2015: 1-6.

[7] Hasan M, Hossain E. Distributed resource allocation in D2D-enabled multi-tier cellular networks: an auction approach [C]// Proc of IEEE International Conference on Communications. 2015: 2949-2954.

[8] Zhang Rongqing, Cheng Xiang, Yang Liuqing, *et al.* Interference-aware graph based resource sharing for device-to-device communications underlaying cellular networks [C]// Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2013: 140-145.

[9] Sun Hongguang, Wildemeersch M, Sheng Min, *et al.* D2D enhanced heterogeneous cellular networks with dynamic TDD [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2015, 14 (8): 4204–4218.

[10] Gale D, Shapley L S. College admissions and the stability of marriage [J]. The American Mathematical Monthly, 1962, 69 (1): 9-15.

[11] Islam M T, Taha A M, Akl S G, *et al.* A stable matching algorithm for

resource allocation for underlaying device-to-device communications [C]// Proc of IEEE International Conference on Communications. 2016: 1-6.

[12] ITU-R Recommendation M. 1225. Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000 [S]. International Telecommunication Union. 1997.

[13] Sun Hongguang, Sheng Min, Wang Xijun, *et al.* Resource allocation for maximizing the device-to-device communications underlaying LTE-advanced networks [C]// Proc of IEEE//CIC International Conference on Communications in China – Workshops. 2013: 60-64.

[14] Gurobi. Optimization-the best mathematical programming solver [CP/OL]. http://www. gurobi. com.